



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**VLIV TEPLOTNÍHO REŽIMU VYTVRZOVÁNÍ SLITIN TYPU  
AL-SI NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI**

INFLUENCE OF THERMAL TREATMENT REGIME OF AL-SI ALLOYS ON MECHANICAL PROPERTIES

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Juraj Letovanec**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.**

**BRNO 2018**



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Bc. Juraj Letovanec**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Slévárenská technologie  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Vliv teplotního režimu vytvrzování slitin typu Al–Si na mechanické vlastnosti

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zjištění vlivu teplotního režimu vytvrzování slitin Al–Si, zejména vlivu rychlosti ochlazování z homogenizační teploty na mechanické vlastnosti.

### Cíle diplomové práce:

Analýza vlivu teplotních podmínek při vytvrzování slitin typu Al–Si–Mg na jejich strukturu a mechanické vlastnosti. Zjištění vlivu licí teploty a teploty kokily na primární strukturu zkušebních těles. Zjištění vlivu rychlosti ochlazování z homogenizační teploty na mechanické vlastnosti slitiny.

### Seznam doporučené literatury:

GRUZLESKI, J.E. The Treatment of Liquid Aluminium-Silicon Alloys. AFS Inc. Des Plaines, Illinois, 1990. ISBN 0-87433-121-8.

GRUZLESKI, J.E. Microstructure Development During Metalcasting. AFS Inc. Des Plaines, Illinois, USA, 2000. ISBN 0-87433-204-4.

BÄCKERUD, L., G. CHAI, J. TAMMINEN. Solidification Characteristics of Aluminium Alloys. ASK/Skanaluminium, 1990. ISBN 0-87433-119-6.

Advances in the Metallurgy of Aluminium Alloys. Edited by Murat Tiryakioglu. Proceedings from Materials Solutions Conference on Aluminium Alloys. ASM International, Material Park Ohio, USA, 2001. ISBN 0-87170-747-0.

MICHNA, Š. a kol. Encyklopedie hliníku. Prešov: ADIN, s.r.o, 2005. ISBN 80-89041-88-4.

SCHNEIDER, M. Simulation of microstructure and mechanical properties. International Conference on modelling of casting. Schladming, Austria, 2012. ISSN 1757-8981.

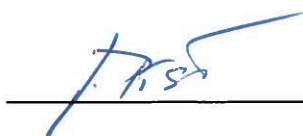

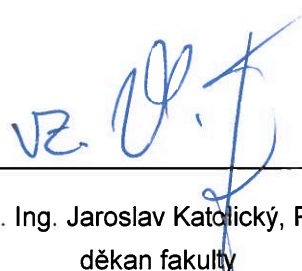
DAMBAUER, G., T. PABEL, P. SCHUMACHER. Optimierung der Wärmebehandlungsparameter der Legierung EN AC- $\text{AlSi7Mg0,x}$ . Giesserei-Rundschau 53, 2006, č. 3-4, s. 50-56.

VEVERKA, A., J. ROUČKA. Relationship between cooling rate, structure and mechanical properties of Al-Si alloys. 13th International Students Day of Metallurgy. Leoben. 2006. ISBN: 3-901384-18-9.

Aluminium casting technology. 2nd edition. AFS Inc. Des Plaines, Illinois, USA, 1993. ISBN 0-87433-157-9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 25. 10. 2017

		
_____ prof. Ing. Miroslav Píška, CSc. ředitel ústavu		_____ doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

## **Abstrakt**

Práca sa zaoberá vplyvom režimu vytvrdzovania, konkrétne rýchlosťou ochladzovania, na mechanické vlastnosti hliníkovej zliatiny AlSi7Mg0,3. Testovacie vzorky boli po rozpúšťacom žíhaní ochladzované do vody s rôznou teplotou a precipitačne vytvrdené. Na tepelne spracovaných vzorkách boli vykonané skúšky ťahom, meranie tvrdosti a pozorovanie mikroštruktúry.

## **Summary**

The aim of this thesis is influence of precipitation hardening regime, specifically quench rate, on mechanical properties of aluminium alloy A356 (AlSi7Mg0.3). Samples were after solution treatment quenched into water with different temperatures and age hardened. Tensile strength tests, hardness tests and microstructure observations were done after heat treatment.

## **Klíčová slova**

tepelné spracovanie hliníkových zliatin, vytvrdzovanie, rýchlosť ochladzovania, mechanické vlastnosti

## **Keywords**

heat treatment of aluminium alloys, precipitation hardening, quench rate, mechanical properties

LETOVANEC, J. *Vliv teplotního režimu vytvrzování slitin typu Al-Si na mechanické vlastnosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 36 s. Vedoucí doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.



Vyhlasujem, že som predkladanú prácu vypracoval sám, s použitím uvedenej odbornej literatúry a na základe pripomienok vedúceho práce.

Bc. Juraj Letovanec





Ďakujem vedúcemu práce doc. Ing. Jaromírovi Roučkovi, CSc. za jeho odborné vedenie, cenné rady a pripomienky. Moja vďaka patrí tiež Ing. Janu Svobodovi a Ing. Přemyslovi Šiškoví z firmy Kovolit za významnú pomoc pri odlievaní vzoriek a ich mechanických skúškach. Ďakujem tiež Ing. Mojmírovi Vaněkovi, PhD. a Ing. Markovi Slováčkovi, PhD. z firmy Mecas ESI za pomoc pri spracovaní simulácií použitých v tejto práci.

Bc. Juraj Letovanec



# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Tepelné spracovanie zliatin hliníka</b>	<b>3</b>
2.1	Žíhanie . . . . .	3
2.1.1	Stabilizačné žíhanie . . . . .	3
2.1.2	Žíhanie na zníženie pnutia . . . . .	4
2.1.3	Homogenizácia . . . . .	4
2.2	Vytvrdzovanie . . . . .	4
2.2.1	Rozpúšťacie žíhanie . . . . .	6
2.2.2	Ochladenie . . . . .	8
2.2.3	Precipitačné vytvrdzovanie . . . . .	13
2.3	Označovanie režimov tepelného spracovania . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Experiment</b>	<b>18</b>
3.1	Odlievanie vzoriek . . . . .	18
3.2	Tepelné spracovanie . . . . .	20
3.2.1	Rozpúšťacie žíhanie . . . . .	20
3.2.2	Ochladzovanie . . . . .	21
3.2.3	Precipitačné vytvrdzovanie . . . . .	23
3.3	Meranie mechanických vlastností . . . . .	24
3.4	Pozorovanie mikroštruktúry . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Diskusia výsledkov</b>	<b>26</b>
4.1	Mikroštruktúra po odliatí . . . . .	26
4.2	Mechanické vlastnosti . . . . .	26
4.2.1	Pevnosť v ťahu, ťažnosť . . . . .	29
4.2.2	Tvrdosť . . . . .	30
4.3	Lomová plocha po pretrhnutí . . . . .	31
4.4	Mikroštruktúra po tepelnom spracovaní . . . . .	32
<b>5</b>	<b>Záver</b>	<b>34</b>

# 1. Úvod

V úvodnej teoretickej časti práce sú popísané druhy tepelného spracovania, ktoré sa používajú v súvislosti s hliníkovými zliatinami a výrobkami z nich a aký majú vplyv na ich mechanické vlastnosti. Dôraz je kladený na vytvrdzovanie, pomocou ktorého sa dajú upraviť mechanické vlastnosti hliníkových zliatin. Možnosti kombinácií mechanických vlastností sú rôzne (maximálna tvrdosť, maximálna ťažnosť) a dajú sa meniť nastavením parametrov jednotlivých krokov vytvrdzovania. Sú nimi rozpúšťacie žíhanie, ochladenie a precipitačné vytvrdzovanie, tiež nazývané stárnutie.

Na nastavenie vhodných parametrov, najmä rozpúšťacieho žíhanie, má vplyv disperzita štruktúry zliatiny po odliatí. Bol preto zisťovaný vplyv teploty kovovej kokily, do ktorej boli skúšobné tyčky odlievane na hodnotu DAS (Dendrite Arm Spacing).

Experiment sa zameriava na zistenie vplyvu rýchlosti ochladzovania na zliatiny typu Al-Si-Mg, konkrétne na zliatinu AlSi7Mg0,3 označovanú aj A356. Parametre rozpúšťacieho žíhanie a precipitačného vytvrdzovania sú vo všetkých experimentoch nemenné. Rýchlosť ochladzovania sa mení pomocou teploty vody, ktorá bola v tomto experimente použitá ako ochladzovacie médium. Vplyv na mechanické vlastnosti bol zisťovaný pomocou ťahovej skúšky a merania tvrdosti.

## 2. Tepelné spracovanie zliatin hliníka

Tepelné spracovanie súčiastok zo zliatin hliníka sa používa na zlepšenie mechanických a technologických vlastností, zníženie vnútorných pnutí, alebo ovplyvnenie rozloženia prvkov v štruktúre. V závislosti na technológii (tvárnenie, odlievanie), ktorou súčiastka nadobudla tvar, sa uplatňujú rôzne spôsoby tepelného spracovania. Ďalej sa budeme zaoberať tými, ktoré sú používané pri odliatkoch. Tepelne sa spracovávajú odliatky liate gravitačne, alebo do kovových foriem, pri ktorých je vnútorná štruktúra hrubšia. Pri tlakovo liatych odliatkoch, ktorých štruktúra je jemnejšia a homogénnejšia sa tepelné spracovanie používa zriedkavejšie. [1][2]

Priebeh tepelného spracovania popisuje tzv. žíhací cyklus. Ten pozostáva z ohrevu na určitú teplotu, výdrže na tejto teplote a z ochladzovania. Jednotlivé druhy tepelného spracovania sa líšia v rýchlosti ohrevu, dobe výdrže na teplote a rýchlosti ochladzovania. Tepelné spracovanie môže pozostávať aj z viacerých takýchto cyklov. [1]

Tepelné spracovanie zliatin hliníka sa dá rozdeliť do dvoch základných skupín [1];

- Žíhanie
- Vytvrdzovanie

### 2.1. Žíhanie

Pri odliatkoch zo zliatin hliníka sa uplatňuje niekoľko druhov žíhania v závislosti na požadovaných mechanických vlastnostiach a podmienkach, v ktorých bude súčiastka prevádzkovaná. [1]

#### 2.1.1. Stabilizačné žíhanie

Účelom tohoto tepelného spracovania je stabilizovanie štruktúry, mechanických, fyzikálnych a chemických vlastností a rozmerov výrobku, ktorý bude prevádzkovaný za zvýšených teplôt. Uplatňuje sa pri presných súčiastach, napr. pre optický priemysel. Teplota stabilizačného žíhania je vyššia, ako predpokladaná prevádzková teplota, obvykle leží v rozmedí 240 - 350 °C. Ochladzovanie na vzduchu. [1][2]

## 2.2. VYTVRDZOVANIE

### 2.1.2. Žihanie na zníženie pnutia

Vnútorne pnutie v odliatku vzniká v dôsledku nerovnomrnej rýchlosti ochladzovania rôznych prierezov, alebo vplyvom brzdeného zmrašťovania v nepoddajnej forme. Pnutie môže nastať aj po zváraní. [2][3]

Žihací cyklus pozostáva z ohrevu a výdrži na teplote nižšej ako je rekryštalizačná (obvykle 300 - 400 °C) a z riadeného ochladzovania minimálne do teploty 200 °C. [1][2]

### 2.1.3. Homogenizácia

Slúži na zníženie, prípadne odstránenie chemickej heterogenity, ktorá v odliatkoch vzniká v priebehu tuhnutia. Teplota homogenizácie leží nad krivkou rozpustnosti prísadového prvku v tuhom roztoku  $\alpha$ . Dĺžka výdrže na teplote homogenizácie závisí predovšetkým na chemickom zložení a štruktúre zliatiny. [1][2]

Nerovnovážnosť štruktúry spočíva v prítomnosti nerovnovážnych intermetalických fází (napr.  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ), rovnovážnych intermetalických fází (napr.  $\text{FeAl}_3$ ) a presýteného tuhého roztoku  $\alpha$ . V hrubostenných odliatkoch, alebo ingotoch sa chemické zloženie na kraji a v teplotnej osi, kde sú vplyvom segregácie vylúčené prísadové prvky a nečistoty, môže tiež značne líšiť. [1][4]

Rozhodujúcu úlohu v procese homogenizácie majú difúzne procesy, na ktoré má, okrem iného, vplyv difúzny koeficient jednotlivých prvkov, alebo dĺžka difúznej dráhy, teda veľkosť dendritických buniek. [1]

Samostatne sa tento spôsob tepelného spracovania využíva najmä na zaručenie dobrej tvárnosti za tepla. Pri odliatkoch býva väčšinou súčasťou vytvrdzovania. V tejto súvislosti bude podrobne popísané v kap. 2.2. [1][2]

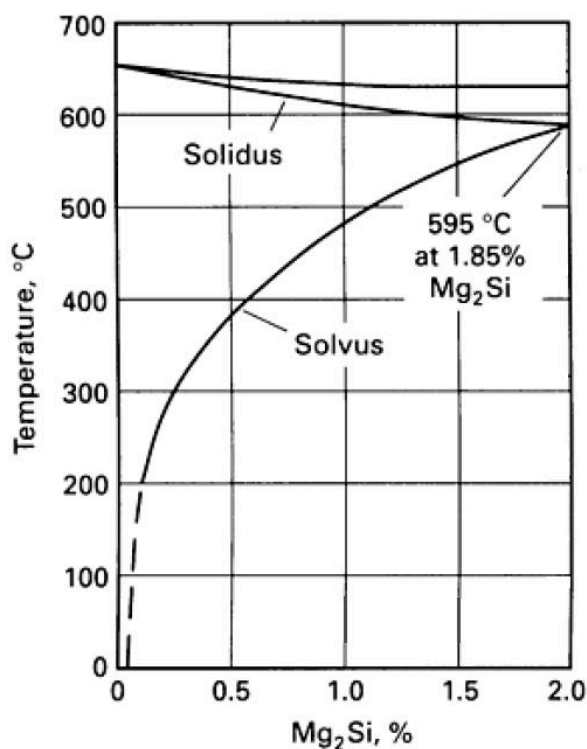
## 2.2. Vytvrdzovanie

Vytvrdzovanie je najvýznamnejším druhom tepelného spracovania zliatin hliníka. Do značnej miery sa ním dajú meniť fyzikálne, technologické a mechanické vlastnosti. Medza pevnosti ( $R_m$ ) a medza klzu ( $R_{p0,2}$ ) sa podstatne zvyšujú, ťažnosť sa v závislosti na režime môže mierne znižovať. [1][2]

## 2. TEPELNÉ SPRACOVANIE ZLIATIN HLINÍKA

Podmienkou pre to, aby bola zliatina vytvrditeľná je, že jej rovnovážny diagram musí vykazovať výraznú zmenu rozpustnosti prísadového prvku (prvkov) na teplote (Obr. 2.1). To zaručí možnosť vytvorenia presýneného roztoku  $\alpha$ . Takéto zliatiny sa nazývajú "vytvrditeľné". Patria medzi ne:

- Al-Cu, kde je vytvrdzujúcou fázou  $\text{CuAl}_2$
- Al-Cu-Mg, kde horčík napomáha precipitácii
- Al-Mg-Si, vytvrdzujúcou fázou je  $\text{Mg}_2\text{Si}$
- Al-Zn-Mg, vytvrdzujúcou fázou je  $\text{MgZn}_2$
- Al-Zn-Mg-Cu [1][2][4]



Obr. 2.1: Rovnovážny diagram Al -  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . [4]

Prísadové prvky v odliatkoch, ktoré stuhli relatívne pomaly, v pieskovej alebo kovovej forme, sú vylúčené vo forme hrubých rovnovážnych častíc. Tie majú nepriaznivý vplyv na mechanické vlastnosti. Cieľom vytvrdzovania je ich spätné rozpustenie do tuhého roztoku  $\alpha$  a ich následné vylúčenie v podobe jemných koherentných, alebo semikoherentných precipitátov. Tie naopak spôsobia spevnenie zliatiny. [2]

## 2.2. VYTVRDZOVANIE

Proces vytvrdzovania pozostáva z troch častí [2]:

- Rozpúšťacie žíhanie - tvorba tuhého roztoku  $\alpha$
- Ochladenie - vznik presýteného roztoku  $\alpha$
- Precipitačné vytvrdzovanie (stárnutie)

### 2.2.1. Rozpúšťacie žíhanie

Cieľom tohoto kroku je získať homogénny tuhý roztok  $\alpha$ , v ktorom bude rozpustené maximálne množstvo vytvrdzujúcich prvkov. Teplota a doba výdrže závisí od konkrétnej zliatiny, mala by ležať nad krivkou rozpustnosti prísadového prvku a 10 až 15 °C pod eutektickou teplotou. Nepriaznivým dôsledkom prehriatia nad túto teplotu je natavenie zliatiny na hraniciach zŕn, čo obvykle nie je detekovateľné nedeštruktívnymi metódami. Dôsledkom je zhoršenie mechanických vlastností. Teplota sa udržiava v pomerne úzkom rozmedzí,  $\pm 6$  °C. [2][4]

Dôležitá je aj rýchlosť, akou sa požadovaná teplota dosiahne. Musí byť dostatočne malá na to, aby sa vytvrdzujúci prvok stíhal v priebehu orheivania postupne rozpúšťať. Pri príliš rýchlom ohreve nie je dostatok času na postupné rozpustenie sa vytvrdzujúcej fázy. Ak sa miesta, v ktorých sa vyskytujú ešte nerozpustené čiastočky vyzvrdzujúcej fázy ohrejú na príliš vysokú teplotu, materiál sa môže na rozhraní kovovej matrice a vytvrdzujúcej fázy nataviť. Pri dostatočnej výdrži na teplote sa vytvrdzujúca fáza rozpustí a natavené miesta opäť stuhnú. Dôležité je zliatinu neschladiť skôr, ako sa to stane. [4]

Doba výdrže na teplote rozpúšťacieho žíhania musí byť dostatočná na to, aby sa rozpustilo maximálne množstvo vytvrdzujúcich fáz a vytvoril sa dostatočne homogénny tuhý roztok  $\alpha$ . Tento čas významne závisí na miktorštruktúre pred tepelným spracovaním. Čím je štruktúra hrubšia, tým sú dlhšie difúzne dráhy a teda čas potrebný na dosiahnutie homogénneho roztoku je dlhší. Rovnako záleží na hrúbke steny spracovávaného odliatku, množstve kusov v peci, ich polohe a rozmistnení. Odporúčané časy pre konkrétne zliatiny a hrúbky stien su dostupné v literatúre, napr. [4]. Môžu sa pohybovať od minút pre tenkostenné odliatky až po 20 h pre veľké odliatky liate do pieskových foriem. [2][4]

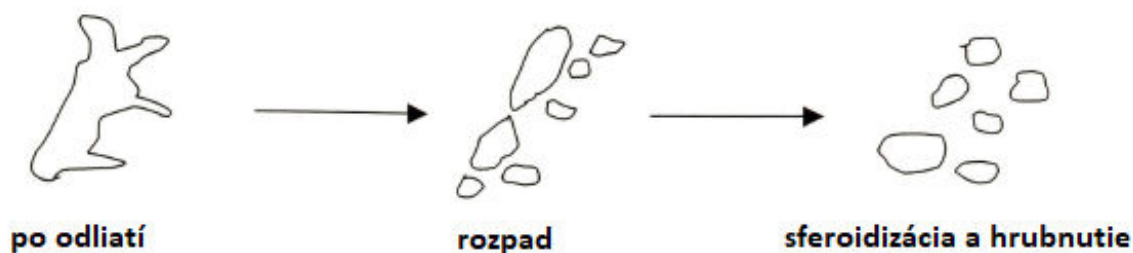
Príliš dlhý čas rozpúšťacieho žíhania v kombinácii s porozitou môže viesť k horším mechanickým vlastnostiam po vytvrdnutí. Podľa štúdie [6], ktorá skúmala vplyv doby



## 2. TEPELNÉ SPRACOVANIE ZLIATIN HLINÍKA

žihania na zliatinu A356 ( $\text{AlSi7Mg0,3}$ ), počas žihania difundujú atómy horčíka do pórov, kde vytvárajú oxidy. Tieto atómy následne chýbajú v tuhom roztoku  $\alpha$  a nemôžu sa teda zúčastňovať na tvorbe vytvrdzujúcich precipitátov  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , vďaka čomu nie je možné dosiahnuť očakávané mechanické vlastnosti.

Vplyv na výsledné mechanické vlastnosti má aj tvar eutektického kremíka, ktorý sa počas rozpúšťacieho žihania mení. Pri dostatočnej teplote a dlhej dobe zotrvania na nej častice kremíka nadobúdajú, v rámci znižovania povrchovej energie, oblý tvar, čo má vplyv na zvyšovanie ťažnosti zliatiny (Obr. 2.2). Ak je eutektikum modifikované, alebo bola zliatina ochladená dostatočne rýchlo a častice kremíku už sú jemné a čiastočne zaoblené, proces sferoidizácie môže byť dokončený už po 1 hodine. Naopak v prípade nemodifikovaného eutektika tento proces môže trvať aj viac ako 12 hodín. Príliš dlhý čas zotvania na teplote vedie k hrubnutiu častíc kremíka. [8]



Obr. 2.2: Postup sferoidizácie eutektického kremíka v nemodifikovanej zliatine [8]

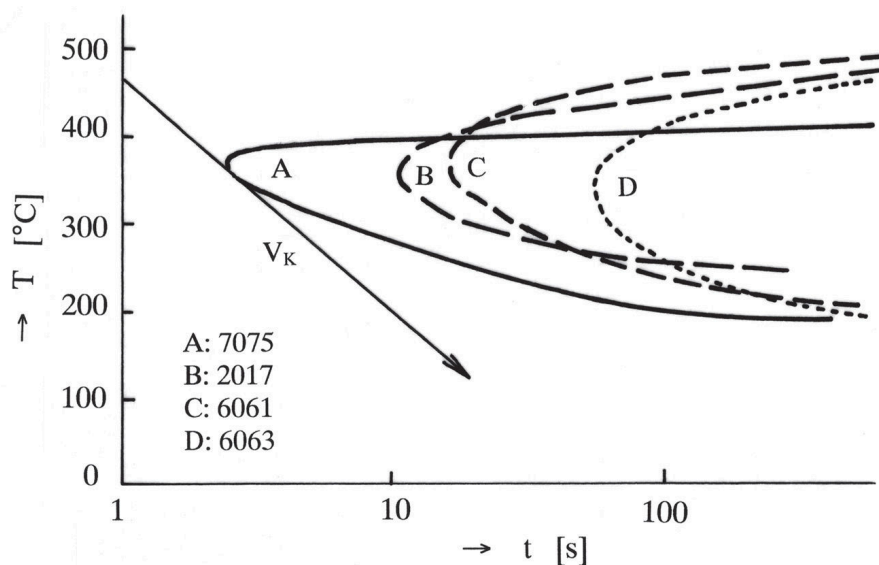
Zmena morfológie častíc kremíka je dôvodom pre dlhé časy výdrže na teplote rozpúšťacieho žihania. Pre zliatinu A356 ( $\text{AlSi7Mg0,3}$ ) bol homogénny tuhý roztok  $\alpha$  s rozpustenými vytvrdzujúcimi časticami  $\text{Mg}_2\text{Si}$  pozorovaný pri teplote  $540^\circ\text{C}$  už po 15 min. [7]

Rozpúšťacie žihanie nie je nutné zaradiť v prípade zliatin, ktoré nie sú príliš citlivé na rýchlosť ochladzovania. Ak je čas medzi predchádzajúcou operáciou za tepla (odlievanie, tvárnenie za tepla) a ochladením dostatočne krátky, tuhý roztok sa nestihne rozpadnúť a tak nie je nutné hrubé precipitáty vytvrdzujúcej fázy spätne rozpúšťať. Citlivosť na rýchlosť ochladzovania bude podrobnejšie popísaná v kap. 3.2.2. [4]

## 2.2. VYTVRDZOVANIE

### 2.2.2. Ochladenie

Bezprostredne po rozpúšťacom žíhaní nasleduje prudké ochladenie odliatku s cieľom zabrániť vylúčeniu vytvrdzujúcej fázy z tuhého roztoku  $\alpha$  a dosiahnuť tak presýtený roztok za izbovej teploty. Ochladzovanie sa robí väčšinou do vody, ktorej teplota sa líši v závislosti na zliatine a jej citlivosti na rýchlosť ochladzovania. Pri voľbe teploty vody a rýchlosti ochladzovania sa treba riadiť dvomi protichodnými požiadavkami. Na jednej strane nesmie byť rýchlosť príliš veľká, aby prudké ochladenie nespôsobilo príliš veľké pnutie v odliatku, prípadne deformáciu rozmerov. Na druhej strane musí byť rýchlosť ochladzovania dostatočná, kritická, alebo nadkritická, aby sa zabránilo vylúčeniu hrubých rovnovážnych častíc vytvrdzujúcej fázy, čo by malo za následok horšie mechanické vlastnosti. Pre tvarovo zložité súčiastky s rôznymi hrúbkami stien, ako napríklad odliatky, literatúra uvádza odporúčanú teplotu vody 65 až 80 °C. Pri voľbe rýchlosti ochladzovania môžu poslúžiť tzv. C krivky. Na obr. 2.3 je príklad takýchto kriviek pre niekoľko zliatin hliníka určených pre tvárnenie. [1][2]



Obr. 2.3: C krivky pre zliatiny EN AW 7075 (AlZn5,5MgCu), EN AW 2017 (AlCu4MgSi), EN AW 6061 (AlMg1SiCu) a EN AW 6063 (AlMg0,7Si) s naznačenou kritickou rýchlosťou ochladzovania pre prvú z nich [1]

## 2. TEPELNÉ SPRACOVANIE ZLIATIN HLINÍKA

Teplota [°C]	Rýchlosť [m.s <sup>-1</sup> ]	H
27	0	1,07
	0,25	1,35
	0,5	1,55
38	0	0,99
	0,25	1,21
	0,5	1,48
71	0	0,21
	0,25	0,57
	0,5	0,79

Tabuľka 2.1: Vplyv rýchlosti prúdenia vody na Grossmannov faktor [4]

Na určenie vzťahu medzi ochladzovaním prostredím a ochladzovaným materiálom, alebo intenzitu ochladzovania sa používa tzv. Grossmannov faktor (H), vyjadrený vzťahom [1]:

$$H = \frac{h}{2 \cdot k},$$

kde  $h$  je koeficient prestupu tepla medzi ochladzovanou súčiastkou a ochladzovacím médium [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>] a  $k$  je tepelná vodivosť súčiastky. Čím je hodnota H vyššia, tým je ochladzovanie intenzívnejšie. Pri ochladzovaní do vody vzniká na povrchu súčiastky para, ktorá zhoršuje podmienky ochladzovania. Koeficient prestupu tepla ( $h$ ) je teda výrazne ovplyvnený rýchlosťou prúdenia ochladzovacieho média na povrchu súčiastky, čo je vidno v tab. 2.1. Ďalej je ovplyvnený vlastnosťami kاليaceho média ako bod varu, viskozita, hustota, tepelná vodivosť a tepelná kapacita. [1][4]

Dôležitý vplyv na proces ochladzovania má doba, počas ktorej je súčiastka premiesňovaná zo žihacej pece do ochladzovacieho média. Počas tohoto presunu nesmie teplota súčiastky klesnúť pod 415 °C. Táto teplota bola určená na základe správania sa zliatiny EN AW 7075 (AlZn5,5MgCu), ktorá je považovaná za zliatinu s "najprísnejšou" C krivkou. Doba premiesňovania zo žihacej pece do ochladzovacieho média by mala byť čo najkratšia, závisí na teplote a rýchlosti prúdenia vzduchu a na masívnosti súčiastky (hrúbke stien), pohybuje sa od 5 do 20 s. [4]

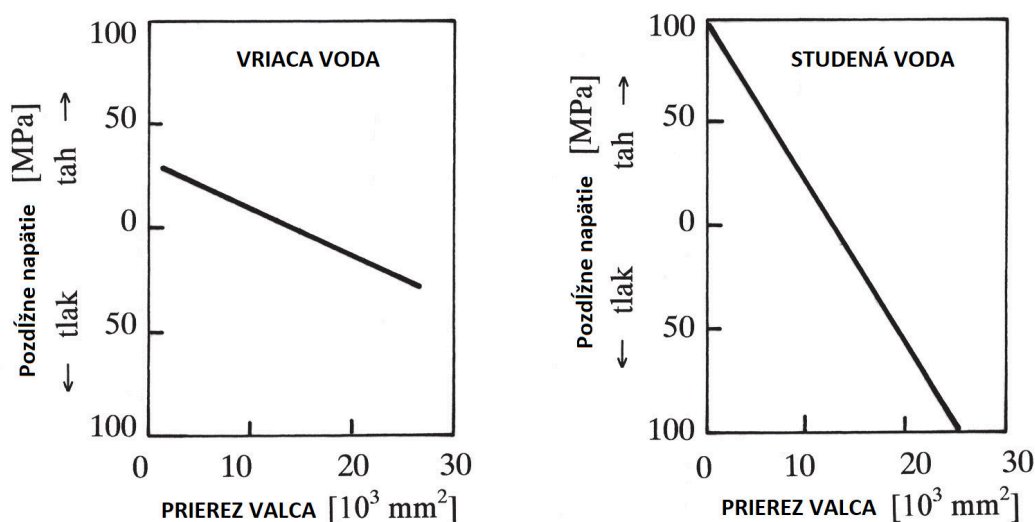
## 2.2. VYTVRDZOVANIE

Vo všeobecnosti sa dá povedať, že čím je rýchlosť ochladzovania vyššia, tým sa dajú dosiahnuť lepšie mechanické a korózne vlastnosti. Hrubé častice vytvrdzujúcej fázy po hraniciach zŕn môžu totiž spôsobovať medzikryštalickú koróziu. [4] [1]

Rýchlosť ochladzovania je ovplyvňovaná aj stavom povrchu ochladzovanej súčiastky. Lesklé, alebo čerstvo obrobené povrchy ju znižujú, naopak povrchy pokryté vrstvou oxidov, alebo hrubé povrchy rýchlosť ochladzovania zvyšujú. [4]

Pri odliatkoch so zložitým tvarom a rôznymi hrúbkami stien môže vplyvom objemových zmien súvisiacich s ochladzovaním vzniknúť zvyškové napätie. V prípade hrubostených odliatkov sa okrajové vrstvy ochladia, zatiaľ čo stred má stále vysokú teplotu a s tým súvisiaci väčší objem. To spôsobuje ťahové napätie vo vrchnej vrstve. Závislosť napätia na veľkosti prierezu pri ochladzovaní do studenej a do vriacej vody je znázornený na obr.

2.4. [1][4]



Obr. 2.4: Vplyv ochladzovania z teploty 540 °C na zvyškové napätie na valce zo zliatiny EN AW 6151 (AlSi0,9Mg0,6Cr0,25). [1]

Vzhľadom na to, že po ochladení má materiál vlastnosti ako po rozpúšťacom žíhaní, teda vysokú plasticitu, je možné prípadné zmeny tvaru vplyvom zvyškového napätia napraviť rovnaním pomerne jednoducho. [4]

Pre rýchlosť ochladzovania je dôležité aj rozmiestenie odliatkov v chladiacom kúpeli a dostatočný objem chladiaceho média. V prípade, že je pohyb vody zabezpečovaný tryskou,

## 2. TEPELNÉ SPRACOVANIE ZLIATIN HLINÍKA

nesmie smerovať priamo na určité miesto súčiastky, aby nenastalo príliš veľké lokálne ochladenie, ktoré by mohlo spôsobiť napätie v súčiastke. [4]

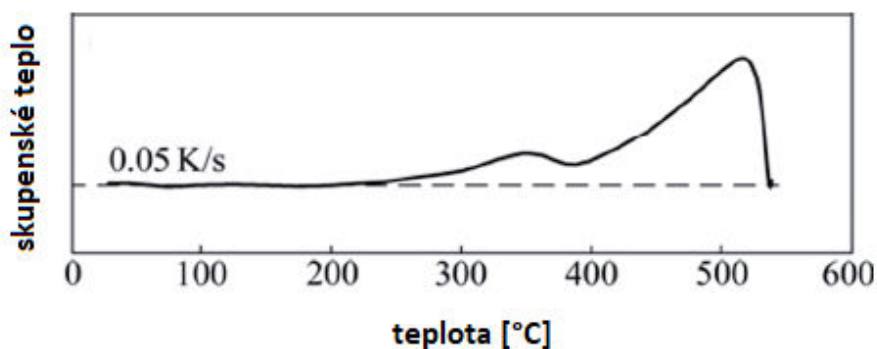
Každý druh hliníkovej zliatiny je inak citlivý na rýchlosť ochladzovania. Za najcitlivejšiu sa v literatúre [4] považuje zliatina EN AW 7075 ( $\text{AlZn5,5MgCu}$ ), ktorej kritická rýchlosť ochladzovania je 300 K/s. Zliatiny typu Al-Zn majú tuhý roztok veľmi stabilný, môžu byť ochladzované aj na vzduchu, alebo v teplej vode. [1] Zliatiny typu Al-Mg (určené pre tvárnenie) majú naopak tuhý roztok tak nestabilný, že jeho presýtenosť pri izbovej teplote sa nedá dosiahnuť ani pri vysokých rýchlostiach ochladzovania. Preto sa, napriek tomu, že splňajú podminku vysokej zmeny rozpustnosti prísadového prvku v tuhom roztoku  $\alpha$ , pre vytvrdzovanie použiť nedajú. [1]

Citlivosťou zlievarenských zliatin typu Al-Si-Mg sa zaoberalo niekoľko štúdií. Hernández Paz [8] zisťoval vplyv teploty ochladzovacej vody na mikrotvrdosť matrice zliatiny A356 ( $\text{AlSi7Mg0,3}$ ) po vytvrdzovaní 6 h pri 155 °C. Rozdiely pri teplotách vody 0, 22, 50 a 70 °C boli minimálne, vzhľadom na smerodajnú odchýlku hodnôt zanedbateľné. Porovnaním veľkosti a rozloženia precipitátov rovnako nezaznamenal relevantné rozdiely.

Milkereit a kol. [9] skúmali vplyv rýchlosti ochladzovania na rovnakú zliatinu (A356) pomocou diferenciálnej skenovacej kalorimetrie. Z výsledkov meraní vidno, že počas tuhnutia prebiehajú dve exotermické precipitačné reakcie. Vysokoteplotné začínajú medzi teplotami 540 °C až 400 °C a vylučuje sa pri nich stabilná  $\beta$  fáza  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . Nasledované sú nízkoteplotnými, ktoré končia okolo teploty 200 °C, pri ktorých sa vylučuje prechodná fáza  $\beta'$  (typy precipitátov budú bližšie popísané v kap. 2.2.3). Potvrdili, že pri zlievarenských zliatinách, ktoré majú, v porovnaní s tými na tvárnenie, vyšší obsah kremíka, hrajú dominantnú úlohu vysokoteplotné precipitačné reakcie, ktoré sú so zvyšujúcou sa intenzitou ochladzovania úspešne potláčané. Nízkoteplotné reakcie sú potlačené už pri rýchlosti ochladzovania 0,1 K/s.

Vplyv rýchlosti ochladzovania na tvrdosť bol skúmaný v rozsahu od 0,01 K/s (HV 40) do 200 K/s (HV 112). Maximálna hodnota, ktorá korešponduje s maximálnymi hodnotami tvrdosti pre túto zliatinu, bola dosiahnutá už pri rýchlosti ochladzovania 60 K/s, čo bolo označené ako kritická rýchlosť ochladzovania. Všetky vzorky boli vytvrdzované 6h pri teplote 160 °C. Pre kontrolu boli okrem vzoriek ochladzovaných v dilatometri niektoré

## 2.2. VYTVRDZOVANIE



Obr. 2.5: Ochladzovacia krivka zaznamenaná pomocou diferenciálnej skenovacej kalorietrie pri rýchlosti ochladzovania 0,05 K/s, čiarkovaná čiara znázorňuje 0 [9]

ochladzované vo vode s teplotou 20 °C. V tomto prípade, pre vzorky s priemerom 6 mm a dĺžkou 22 mm, bola rýchlosť ochladzovania asi 1000 K/s.

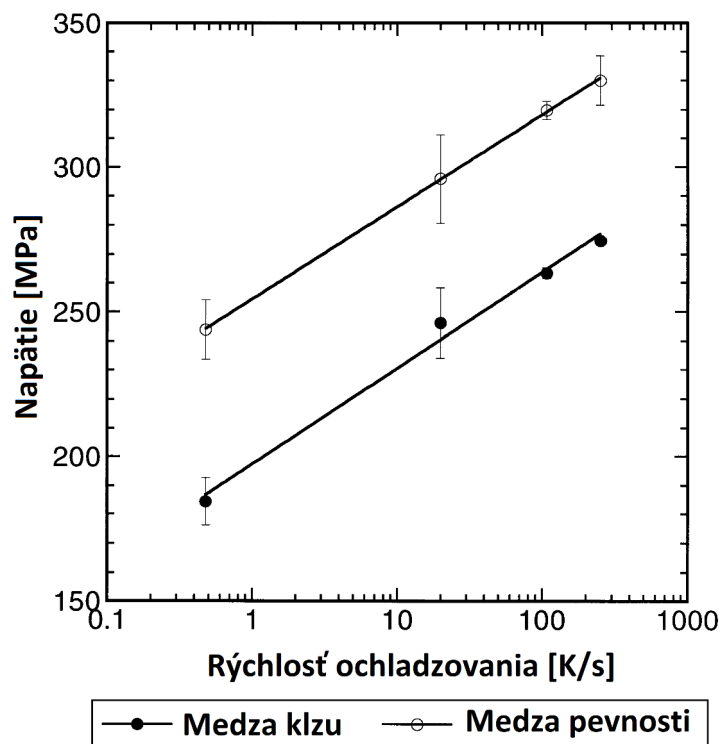
Zhang a Zheng [10] zisťovali vplyv teploty ochladzovacej vody, resp. rýchlosti ochladzovania, na mechanické vlastnosti zliatiny AlSi7Mg0,4. Podľa ich zistení rozdiel v koncentrácii Mg oproti zliatine s jeho obsahom 0,3 % nemá vplyv na citlivosť na rýchlosť ochladzovania. Vzorky boli po ochladení vo vode s teplotou 25 °C (250 K/s), 60°C (110 K/s) a 95 °C (20 K/s) vytvrdzované 6 h pri teplote 170 °C. Bolo zistené, že medza klzu a medza pevnosti sú silne závislé na rýchlosti ochladzovania (Obr. 2.6), v rozsahu rýchlostí obsiahnutých v tejto práci sú na nej závislé podľa vzťahu:

$$R_m(R_{p0,2}) = A \cdot \log(R) + B,$$

kde  $R$  je rýchlosť ochladzovania v K/s a  $A$  a  $B$  sú koeficienty vypočítané tak, aby vzťah čo najlepšie popisoval výsledky experimentu.

Rozdiel vo výsledkoch, v porovnaní so štúdiami, ktoré tvrdia, že v podobnom rozsahu rýchlosť ochladzovania na pevnosť vplyv nemá, podľa autorov spočíva v tom, či je zliatina po ochladení vytvrdená na maximálnu pevnosť, alebo nie. Podľa nich sa na zliatine vytvrdenej pod hranicu maximálnej pevnosti citlivosť na rýchlosť ochladzovania neprejaví.

Miera vystárnutia zliatiny neovplyvňuje citlivosť na rýchlosť ochladzovania vo vzťahu k ťažnosti, ktorej hodnota sa pri znižujúcej sa rýchlosti ochladzovania znižuje. To je podľa autorov spôsobené tým, že pri menších rýchlostiach ochladzovania obsahuje  $\alpha$  matrica hrubé častice  $\beta'$ -Mg<sub>2</sub>Si (popísané v kap.2.2.3), ktoré spôsobujú krehkosť materiálu.



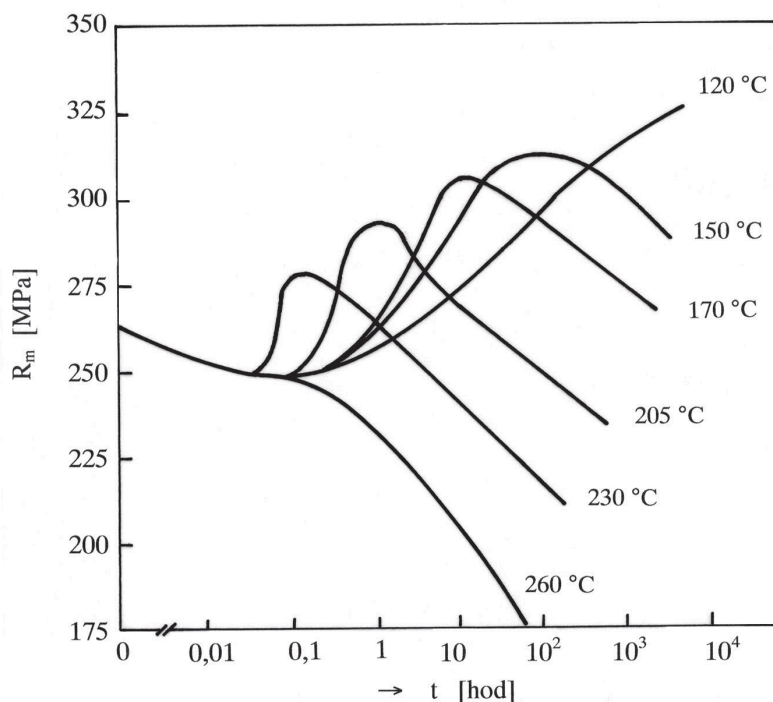
Obr. 2.6: Závislosť medze klzu a medze pevnosti na rýchlosti ochladzovania [10]

### 2.2.3. Precipitačné vytvrdzovanie

Precipitačné vytvrdzovanie, niekedy nazývané stárnutie, je ďalším krokom po ochladení z homogenizačnej teploty. Cieľom je postupný rozpad presýteného tuhého roztoku  $\alpha$  a vylúčenie precipitátov vytvrdzujúcej fázy. Ak rozpad prebieha pri izbovej teplote, hovoríme o prirodzenom stárnutí, alebo vytvrdzovaní za studena. To je prípad zliatin Al-Cu, alebo Al-Zn-Mg, prípadne zliatin Al-Si-Cu s vysokým obsahom medi. Ak vytvrdzovanie prebieha za zvýšených teplôt (zliatiny Al-Si-Mg) hovoríme o umelom stárnutí, alebo vytvrdzovaní za tepla. [1][2]

Proces precipitačného vytvrdzovania je závislý na čase a teplote, pri ktorej prebieha. Vo všeobecnosti pre zliatiny hliníka platí, že čím je vyššia teplota, tým skôr sa dosiahnu maximálne hodnoty pevnosti, ktoré sa pri tejto teplote dajú dosiahnuť. Čím je teplota nižšia, tým sa maximálne hodnoty pevnosti dosiahnu neskôr ale sú vyššie. Tieto zákonitosti ilustruje obr. 2.7. [1][2]

## 2.2. VYTVRDZOVANIE



Obr. 2.7: Závislosť medze pevnosti zliatiny EN AW 6262 (AlMg1SiPb) na dobe vytvrdzovania pri rôznych teplotách vytvrdzovania [1]

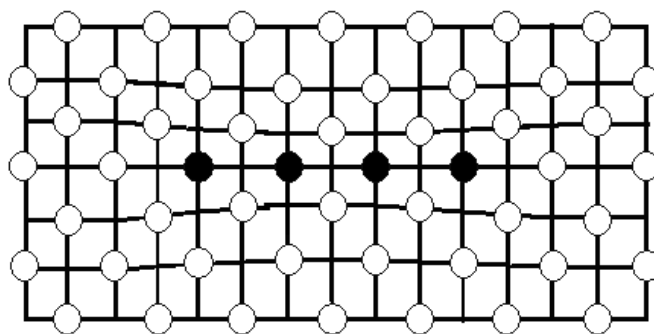
### Postup vylučovania precipitačnej fázy

Na počiatku procesu stárnutia je tuhý roztok  $\alpha$  presýtený vytvrdzujúcim prvkom a vakanciami. Precipitačné reakcie prebiehajú v poradí: koherentné Guinier-Prestonove zóny (ďalej GP-zóny), prechodný precipitát (koherentný, alebo semikoherentný), rovnovážny precipitát (nekoherentný). [1]

GP-zóny sú častice, do ktorých sa v počiatočnom štádiu precipitácie koncentrujú prebytočné atómy prísadového prvku. V počiatočnom štádiu obsahujú asi 100 atómov a sú hrubé 1 až 2 atómové roviny. Hustota GP-zón môže byť až  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Zóna môže mať diskový tvar pri zliatinách Al-Cu (Obr. 2.8), ihlicový tvar pri zliatinách Al-Mg-Si, alebo guľový tvar pri zliatinách Al-Mg. GP-zóny sú so základnou mriežkou kovu koherentné, čo znamená, že mriežka zón nadväzuje na základnú mriežku. Koherencia zón, alebo neskôr ďalších precipitátov spôsobuje deformáciu základnej priežky a ovplyvňuje tak mechanické aj fyzikálne vlastnosti zliatiny. [5]

Aktivačná energia pre tvorbu GP-zón je asi polovičná v porovnaní s aktivačnou energiou pre tvorbu rovnovážneho precipitátu. "Tvorba zón sa považuje za proces voľného





Obr. 2.8: Schématické znázornenie GP-zóny s hrúbkou 1 atómovej roviny v zliatine Al-Cu, čierne sú atómy Cu, biele sú atómy Al [14]

rastu, t.j. proces bez nukleačnej bariéry.”[1] Difúzia v tomto štádiu precipitácie prebieha rýchlejšie, ako by sa dalo čakať na základe rovnovážnych difúzných koeficientov. Je to vysvetlené pohybom vakancií smerom k ”norám”(hranice zŕn, dislokácie), pričom cestou vedú atómy vytvrdzujúceho prvku k zónam a atómy základného kovu od nich. [1][4]

Koherentné a semikoherenté precipitáty pôsobia v kove ako prekážka pohybu dislokácií, čím vzniká pnutie zapríčiňujúce vytvrdzujúci efekt. [1]

V prípade, že precipitácia zájde tak ďaleko, že vznikne hrubý rovnovážny precipitát, ktorý je nekoherentný, hodnoty pevnosti sa znížia. Hovoríme o tzv. disperznom vytvrdzovaní. [1]

Postup vytvrdzovania zliatin Al-Si-Mg je nasledujúci [8]:

ihlicovité GP-zóny → prúťovitá  $\beta'$  fáza ( $\text{Mg}_2\text{Si}$ ) → doštičkovitá stabilná  $\beta$  fáza ( $\text{Mg}_2\text{Si}$ )

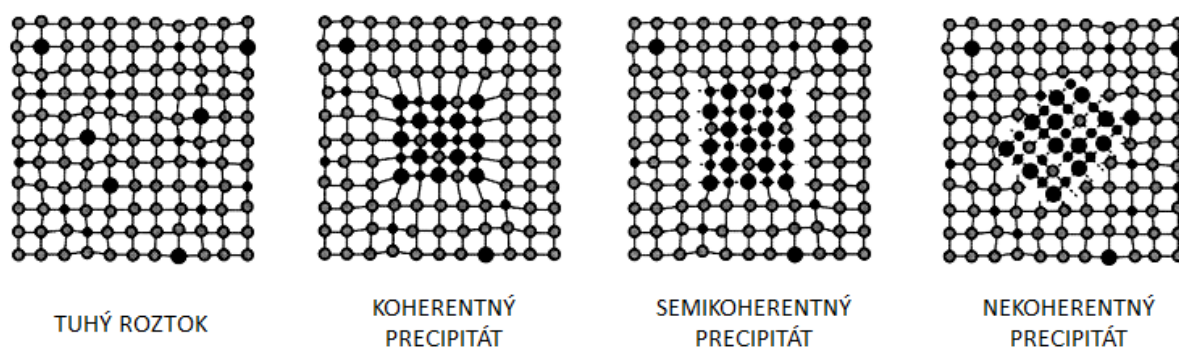
Proces precipitácie je schématicky znázornený na obr. 2.9.

## Prirodzené

Za studena sa dajú vytvrdzovať zliatiny obsahujúce meď. Po rozpúšťacom žíhaní a následnom prudkom ochladení nadobudnú maximálne pevnosti po 4 až 5 dňoch. Pri niektorých zliatinách môže spevňovanie pokračovať aj niekoľko rokov. V prípade, že na súčiastke zo zliatiny so schopnosťou prirodzeného stárnutia treba spraviť operácie ako tvárnenie, alebo rovanie, je možné oddialiť vytvrdzovanie skladovaním týchto súčiastok pri teplote  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , alebo menšej. [4]

### 2.3. OZNAČOVANIE REŽIMOV TEPELNÉHO SPRACOVANIA

Mechanické skúšky a obrábanie sa, vzhľadom na dlhšiu dobu vytvrdzovania, predpisujú až 8 dní po tepelnom spracovaní. [2]



Obr. 2.9: Schématické znázornenie procesu precipitácie [2]

#### Umelé

Vytvrdzovanie za tepla prebieha u zlievarenských zliatin v závislosti na chemickom zložení a požadovaných mechanických vlastnostiach pri teplote 150 °C až 190 °C po dobu 1 až 24 h. Ako bolo spomenuté v úvode tejto kapitoly, pri vyšších teplotách vytvrdzovania sú maximálne hodnoty mechanických vlastností dosiahnuté skôr, avšak sú nižšie ako pri nižších teplotách. Žiaľ, neexistujú parametre, pri ktorých majú všetky mechanické vlastnosti maximálne hodnoty. Preto treba zvoliť čas a teplotu tak, aby zabezpečovali určitý kompromis, alebo sa treba zamerať na jednu konkrétnu vlastnosť (napr. vytvrdzovanie na maximálnu húževnatosť, viď kap. 2.3). Pri voľbe teploty a času vytvrdzovania treba zohľadniť aj jeho cenu vo vzťahu k dosiahnutým parametrom. [1][4]

### 2.3. Označovanie režimov tepelného spracovania

Základné druhy tepelného spracovania sa označujú pomocou písmena:

O - žíhaný stav, v prípade odliatkov na zvýšenie ťažnosti, alebo stabilizáciu rozmerov

W - po rozpúšťacom žhaní, použiteľný pre zliatiny so schopnosťou umelého stárnutia po rozpôšťacom žhaní

T- tepelne spracované do rovnovážneho stavu, iného ako O [4]

## 2. TEPELNÉ SPRACOVANIE ZLIATIN HLINÍKA

Pre ďalšie delenie nasleduje za písmenom jedno, alebo viac čísel, ktoré reprezentujú konkrétnu postupnosť a druh základných operácií tepelného spracovania. Pre výrobu odliatkov sú relevantné nasledujúce (Obr. 2.10):

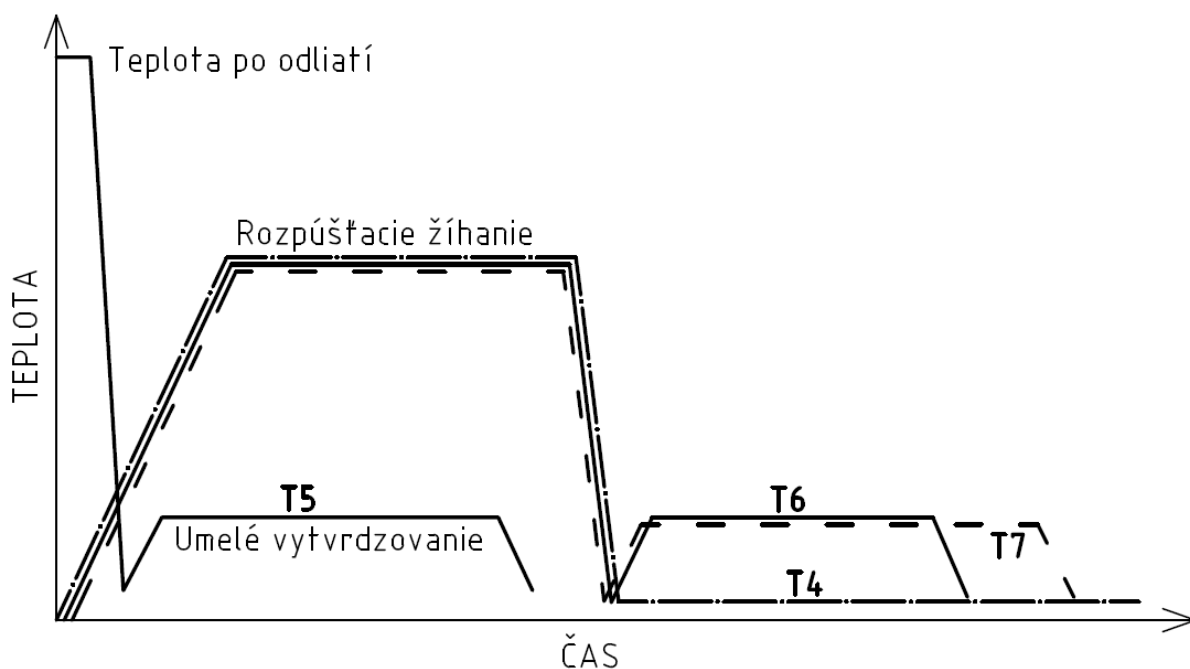
T4 - rozpúšťacie žíhanie a následné prirodzené stárnutie

T5 - ochladenie po odliatí, umelé stárnutie bez rozpúšťacieho žíhania

T6 - rozpúšťacie žíhanie a následné umelé stárnutie

T7 - rozpúšťacie žíhanie a následné umelé stárnutie za hranicu maximálnej pevnosti, tzv. prestárnutie [4][2]

Ďalšia číslica označuje špecifický typ daného tepelného spracovania s požiadavkou na dosiahnutie konkrétnych vlastností, napr. T64 - vytvrdzovanie na maximálnu húževnatosť, alebo T71 - prestárnutie do stabilného stavu (ešte vyššia teplotná stabilita ako T7, pevnosť je však nižšia). [2]



Obr. 2.10: Schématické znázornenie žíhacích diagramov pre jednotlivé druhy tepelného spracovania

## 3. Experiment

Cieľom experimentálnej časti tejto práce bolo zistiť vplyv rýchlosti ochladzovania pri vytvrdzovaní na mechanické vlastnosti zliatiny AlSi7Mg0,3. V tejto kapitole bude popísaný postup prípravy vzoriek, priebeh experimentu a skúšobné metódy použité pri vyhodnocovaní experimentu.

### 3.1. Odlievane vzoriek

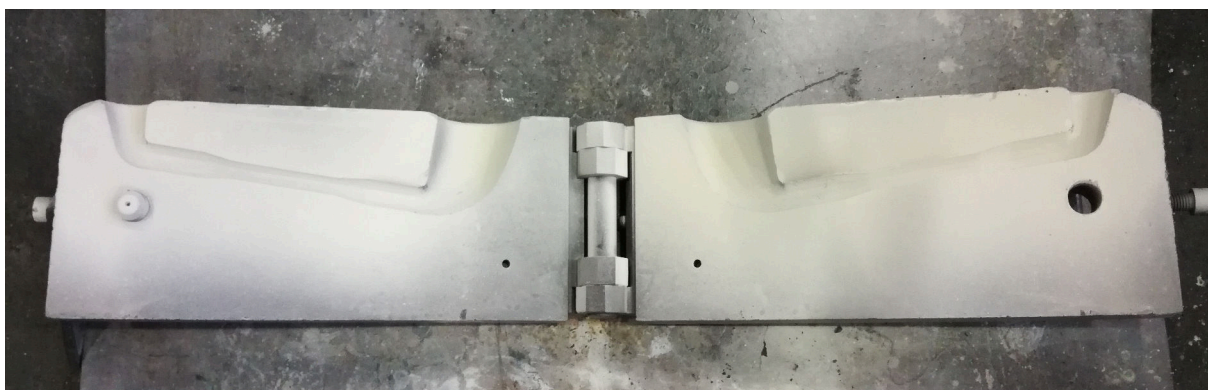
Testovaným kovom bola zliatina AlSi7Mg0,3. Táto zliatina je bežne používaná vo firme Kovolit Modřice, kde prebiehalo aj odlievane vzoriek. Chemické zloženie použitého kovu bolo overené pred a po odliatí vzoriek (Tab. 3.1). Kov bol roztavený na plynovej peci, odplynený na zariadení FDU, nebol modifikovaný. Po odplynení bol kov preliaty do elektrickej odporovej pece, kde bol uržiavaný pri teplote 720 °C.

	Si	Cu	Mn	Mg	Fe	Ti
	[%]					
pred	6,52	0,0083	0,0142	0,293	0,149	0,0873
po	7,17	0,0110	0,0162	0,356	0,187	0,0832

Tabuľka 3.1: Namerané chemické zloženie zliatiny AlSi7Mg0,3.

Testovacou vzorkou bola normalizovaná tyčka pre ťahovú skúšku podľa DIN 50125:2009-07 priemeru 12 mm odlievaná do kovovej kokily (Obr. 3.1). Dutina kokily bola ošetrená náterom *BONDERITE L-CA CG 555 ACHESON*. Pred začiatkom odlievania a počas prestávky bola kolila nahrievaná plameňom.

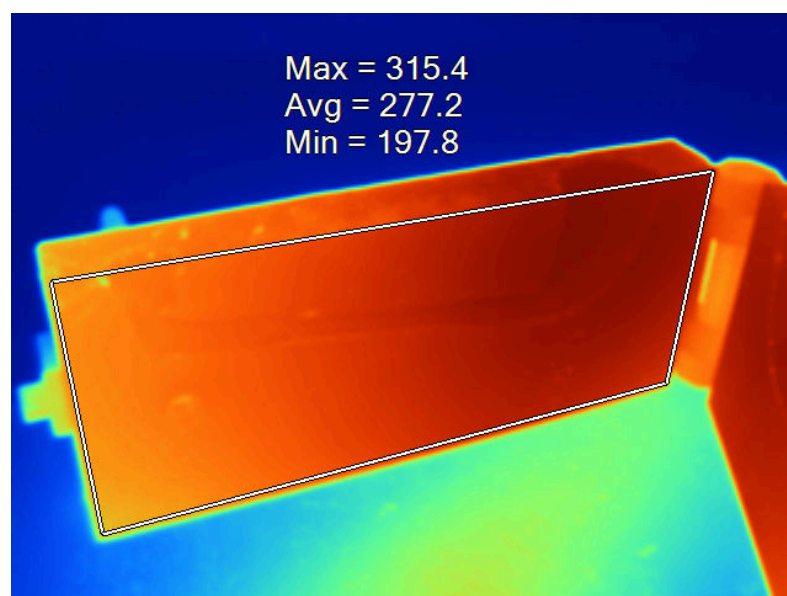
Spolu bolo odliatych 80 tyčiek, z ktorých bolo pre ďalšie experimenty vybratých 28 (7 štvoríc), pri ktorých bola teplota kokily v rozmedzí 295 až 311 °C. Vzorky boli vyberané tak, aby v každej štvorici boli vzorky so zhruba rovnakou teplotou kokily pri odlievaní. Teploty kokily pre vzorky použité pri jednotlivých experimentoch sú uvedené v tab. 3.2. Teplota kokily bola meraná po každom 5. odliatí pomocou termokamery (Obr. 3.2). Ako teplota kokily bola braná priemerná teplota vo vyznačenej oblasti.



Obr. 3.1: Kokila použíá na odlievánie vzoriek ošetroaná náterom.

Por. č. experimentu	Priemerná teplota kokily [°C]
2	310
3	305
4	300
5	305
6	307
7	304

Tabuľka 3.2: Priemerné teploty kokily pri odlievaní tyčiek pre jednotlivé experimenty



Obr. 3.2: Jedna zo smímok otvorenej kokily urobená termokamerou

### 3.2. TEPELNÉ SPRACOVANIE

Po odstránení vtokovej sústavy boli hrany vzniknuté v deliacej rovine zabrúsené pilníkom. Na Obr. 3.3 je zobrazená skúšobná tyčka v stave, v akom bola tepelne spracovaná a následne podrobená ťahovej skúške.



Obr. 3.3: Skúšobná tyčka

## 3.2. Tepelné spracovanie

Každému režimu tepelného spracovania boli podrobené vždy 4 skúšobné tyčky. Tri z nich sa použili na skúšku ťahom, z jednej boli narezané vzorky na skúšku tvrdosti. Pre jednoduchšiu manipuláciu a pre to, aby sa zaručili rovnaké podmienky tepelného spracovania, boli vzorky uchytené v prípravku na obr. 3.4. Prípravok ďalej žabezpečoval zvislú polohu tyčiek pri všetkých krokoch tepelného spracovania. Je zvarový z ocelových polotovarov, skúšobné tyčky sú v ňom uchytené skrutkou.

### 3.2.1. Rozpúšťacie žíhanie

Podmienky rozpúšťacieho žíhania boli vždy rovnaké. Literatúra [4] uvádza teplotu 540 °C s výdržou v rozsahu 4 - 12 h. Vzhľadom na to, že skúšobná tyčka je pomerne tenká, očakávalo sa, že bude prehriata veľmi rýchlo. Ďalej sa, vzhľadom na odlievanie do kovovej formy, očakávalo rýchle tuhnutie a tým pádom jemná mikroštruktúra, z čoho vyplývajú kratšie difúzne dráhy a jemnejšie eutektikum. Preto boli podmienky rozpúšťacieho žíhania stanovené na 6 h pri teplote 540 °C.

Rozpúšťacie žíhanie prebiehalo na elektrickej odporovej peci LAC T 15 V s vnútornými rozmermi  $\phi 330 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$ . Prípravok so skúšobnými tyčkami bol umiestnený na





Obr. 3.4: Prípravok pre manipuláciu so vzorkami

dne (Obr. 3.5). Teplota rozpúšťacieho žihania bola meraná počas celej doby termočlánkom na jednej zo skúšobných tyčiek. Pri všetkých experimentoch sa pohybovala na hodnote  $540\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 3.2.2. Ochladzovanie

Ochladzovanie nasledovalo bezprostredne po rozpúšťacom žíhaní. Čas od otvorenia veka pece, po ponorenie prípravku so skúšobnými tyčkami do vody nepresiahol 7 s. Literatúra odporúča ochladzovať do vody s teplotou v rozsahu 20 až 50 °C [11], prípadne 65 až 100 °C [4]. Pre túto prácu boli, v záujme zisťovania, či bude mať znižovanie teploty za následok zlepšovanie mechanických vlastností, zvolené teploty 5 °C, 10 °C, 17,5 °C, 25 °C, 58 °C a 75 °C. Ochladzovacia voda bola vo valcovej nádobe s priemerom  $\phi 420\text{ mm}$ , výška hladiny bola 400 mm, objem bol teda 60 l. Teplota vody bola upravovaná buď kusmi ľadu, alebo rozžhavenými liatinovými blokmi.

Rýchlosť ochladzovania vzorky v pri rôznych teplotách vody bola vypočítaná pomocou numerickej simulácie firmou Mecas ESI. Pre výpočet bola použitá databáza pre materiál EN AW 6082, ktorého termofyzikálne parametre sa v rozsahu teplôt, použitých pri týchto

### 3.2. TEPELNÉ SPRACOVANIE



Obr. 3.5: Sada skúšobných vzoriek v peci na rozpúšťacie žihanie.

experimentoch, nelíšia. Vzhľadom na rotačný tvar skúšobnej tyčky mohol byť výpočet zjednodušený na 2D symetrický problém. Výpočtová sieť mala rozmer 0,2 mm. Priemerné rýchlosti ochladzovania z teploty rozpúšťacieho žihania 540 °C do 200 °C, kedy sú podľa literatúry [9] všetky precipitačné reakcie ukončené a rýchlosti ochladzovania počas vysokoteplotných precipitačných reakcií pre jednotlivé teploty vody sú uvedené v tab. 3.3.

Teplota vody	[°C]	5	10	17	25	58	65	75
Rýchlosť ochladzovania priemerná	[°C/s]	251	246	239	232	203	197	189
Rýchlosť ochladzovania (540 °C - 400 °C)	[°C/s]	318	316	312	307	288	284	278

Tabuľka 3.3: Vypočítané rýchlosti ochladzovania v osi skúšobnej tyčky



### 3.2.3. Precipitačné vytvrdzovanie

Precipitačné vytvrdzovanie nasledovalo besprostredne po ochladení. Parametre boli stanovené na 150 °C po dobu 4 h. Vytvrdzovanie prebiehalo v elektrickej odporovej peci LAC s vnútornými rozmermi  $\phi 185 \text{ mm} \times 230 \text{ mm}$  (Obr. 3.6).



Obr. 3.6: Sada skúšobných vzoriek v peci na precipitačné vytvrdzovanie.

Teplota vytvrdzovania bola meraná počas celej doby, na skúšobnej tyčke. Výšku teploty sa nepodarilo opakovane nastaviť na rovnakú hodnotu, pri jednotlivých experimentoch sa pohybovala od 149 °C do 162 °C  $\pm 4$  °C.

V tab. 3.4 sú zhrnuté parametre tepelného spracovania pri jednotlivých experimentoch.

### 3.3. MERANIE MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Por. č. experimentu	Rozpúšťacie žihanie	Ochladzovanie	Precipitačné vzvrzdovanie
2	6h 540 °C	voda, 25 °C	4h 155 °C
3		voda, 17 °C	
4		voda, 58 °C	
5		voda, 10 °C	
6		voda, 5 °C	
7		voda, 75 °C	

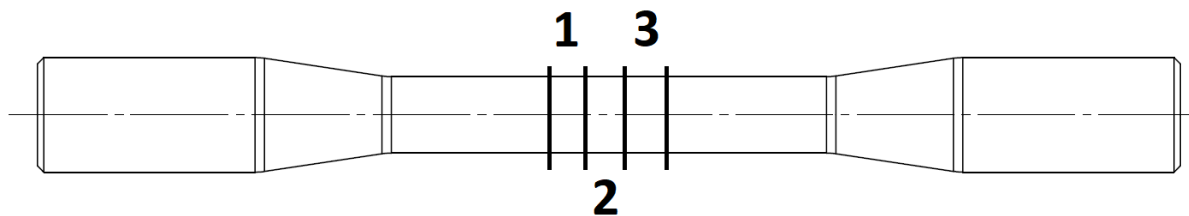
Tabuľka 3.4: Parametre tepelného spracovania pri jednotlivých experimentoch

### 3.3. Meranie mechanických vlastností

Na rôzne tepelne spracovaných skúšobných tyčkách bola vykonaná skúška ťahom a meranie tvrdosti podľa Brinella.

Skúška ťahom bola vykonaná vždy na 3 tyčkách. Výsledná hodnota medze pevnosti, zmluvnej medze klzu a ťažnosti bola určená ako aritmetický priemer z troch meraní.

Vzorky pre meranie tvrdosti boli valčeky hrúbky cca 8 mm, vyrezané zo strednej časti štvrtej skúšobnej tyčky, ako je naznačené na obr. 3.7. Skúška bola vykonaná v rovine rezu.

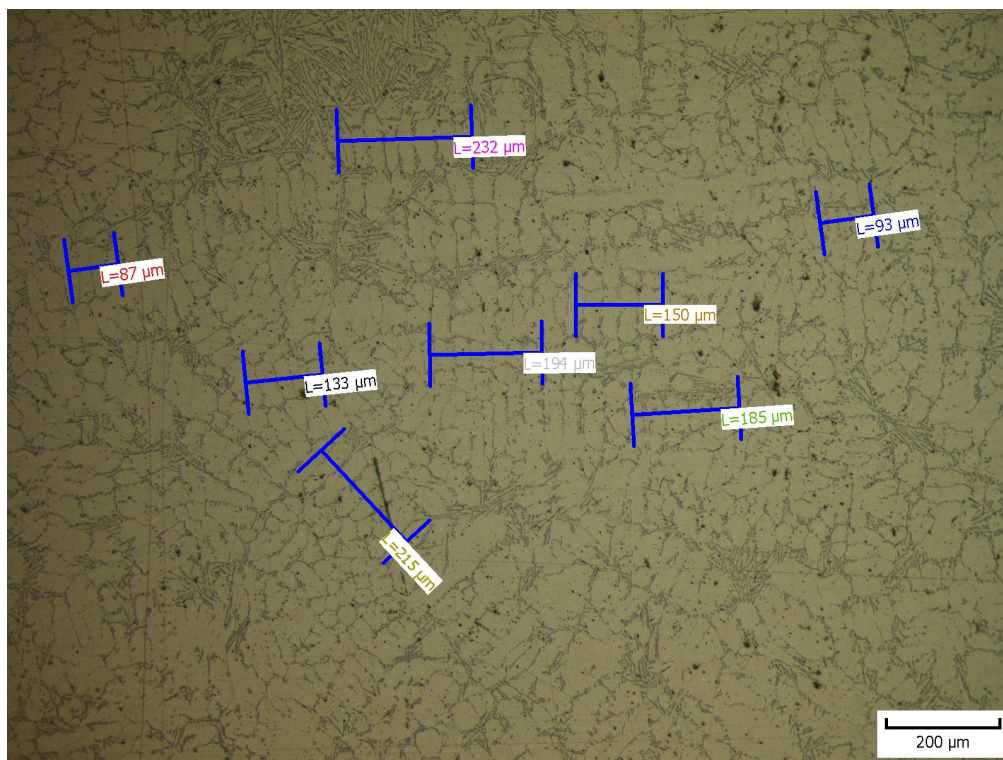


Obr. 3.7: Miesto odberu vzoriek pre meranie tvrdosti.

Meranie tvrdosti sa robilo na tvrdomere *LECO HPO 3000*, priemer vnikajúcej guľičky z tvrdokovu bol 10 mm so zaťažením 1000 kg. Tvrdosť bola vyhodnocovaná pomocou softvéru *QuickPHOTO Industrial 2.3*. Výsledná hodnota bola určená ako medián hodnôt nameraných z troch meraní.

### 3.4. Pozorovanie mikroštruktúry

Pre overenie vplyvu teploty kokily na mikroštruktúru, predovšetkým hodnotu DAS, boli spomedzi odliatych tyčiek vybraté kusy odliate pri rôznych teplotách kokily. Konkrétne pri 344 °C, 322 °C a 310 °C. Z týchto tyčiek boli štandardnými postupmi pripravené metalografické výbrusy, na ktorých bola zmeraná hodnota DAS (Obr. 3.8).



Obr. 3.8: Meranie dĺžky dendritov pre určenie hodnoty DAS.

Po tepelnom spracovaní boli vybraté tyčky ochladzované do vody s teplotou 5 °C a 75 °C, čo boli krajné hodnoty, a tyčka ochladzovaná do vody s teplotou 17,4 °C, ktorá mala najvyššie hodnoty pevnosti. Z týchto tyčiek boli zo vzoriek na meranie tvrdosti štandardnými postupmi pripravené metalografické výbrusy. Mikroštruktúra v nenaleptanom stave bola pozorovaná pomocou optického mikroskopu. Vzhľadom na dostupné zväčšenia bola pozorovaná iba morfológia eutektika.

Pre účely porovnania bola pozorovaná aj mikroštruktúra tyčky, ktorá neprešla tepelným spracovaním.

## 4. Diskusia výsledkov

### 4.1. Mikroštruktúra po odliatí

Hrúbosť mikroštruktúry materiálu ovplyvňuje dobu nutnú na rozpúšťacie žíhanie, ako bolo povedané v kap. 2.1.3. Hodnoty DAS namerané na vzorkách odlievajúcich pri rôznych teplotách kokily sú uvedené v Tab. 4.1.

<b>Teplota kokily</b>	<b>[°C]</b>	<b>344</b>	<b>322</b>	<b>310</b>
<b>DAS</b>	<b>[μm]</b>	<b>25,9</b>	<b>26,4</b>	<b>25,9</b>

Tabuľka 4.1: Namerané hodnoty DAS pri rôznych teplotách kokily

Z uvedených hodnôt je vidno, že ani pri rozdieli v teplote kokily 34 °C nie je rozdiel v priemernej hodnote DAS. Odchýlka v prípade teploty 322 °C je vzhľadom na nepresnosť merania nevýznamná. Na základe týchto údajov môžeme konštatovať, že v rozsahu teplôt kokily nameraných pri tomto experimente, teplota nemá vplyv na hrúbosť štruktúry. Pri ďalšom vyhodnocovaní výsledkov bude teda vplyv teploty kokily pri odlievaní skúšobných tyčiek zanedbaný.

### 4.2. Mechanické vlastnosti

Literatúra [4][12] uvádza pre zliatinu A356 (AlSi7Mg0,3) podrobenú tepelnému spracovaniu T6 typické hodnoty mechanických vlastností: medza pevnosti  $R_m=285$  MPa, zmluvná medza klzu  $R_{p0,2}=205$  MPa, ťažnosť  $A=10\%$  a tvrdosť podľa Brinella 90 HB 10/500.

Na tyčke, ktorá nebola podrobená tepelnému spracovaniu boli nemarené hodnoty:  $R_m=127$  MPa,  $R_{p0,2}=92$  MPa,  $A=1,7\%$  a 52 HBW 10/1000. Hodnoty mechanických vlastností nameraných v rámci tejto práce a ich priemerné hodnoty, resp. mediány sú uvedené v tab. 4.2.

Ako je vidno, ani jedna z testovaných vzoriek nedosiahla hodnoty uvádzané v literatúre. To je veľmi pravdepodobne spôsobené neoptimálnou kombináciou parametrov tepel-

Teplota vody	$R_{p0,2}$	$R_{p0,2}$ priemer	$R_m$	$R_m$ priemer	$A_5$	$A_5$ priemer	HBW	HBW medián
[°C]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[-]	[-]
5	128	148	177	204	0,8	0,8	85	85
	164		226		0,9		83	
	152		210		0,7		87	
10	158	160	219	221	1,5	1,8	73	86
	155		214		1,9		86	
	167		230		1,9		86	
17	168	174	232	241	2,2	2,3	85	84
	177		244		2,5		83	
	178		246		2,4		84	
25	176	168	242	232	2,7	2,9	80	80
	154		213		2,5		79	
	174		240		3,6		84	
58	161	153	222	212	0,9	1,3	68	86
	150		207		1,3		88	
	149		205		1,8		86	
75	146	147	202	202	1,2	1,3	86	86
	169		233		2,0		85	
	125		172		0,7		86	

Tabuľka 4.2: Mechanické vlastnosti v závislosti na teplote ochladzovacej vody, namerané hodnoty a priemerné hodnoty (mediány)

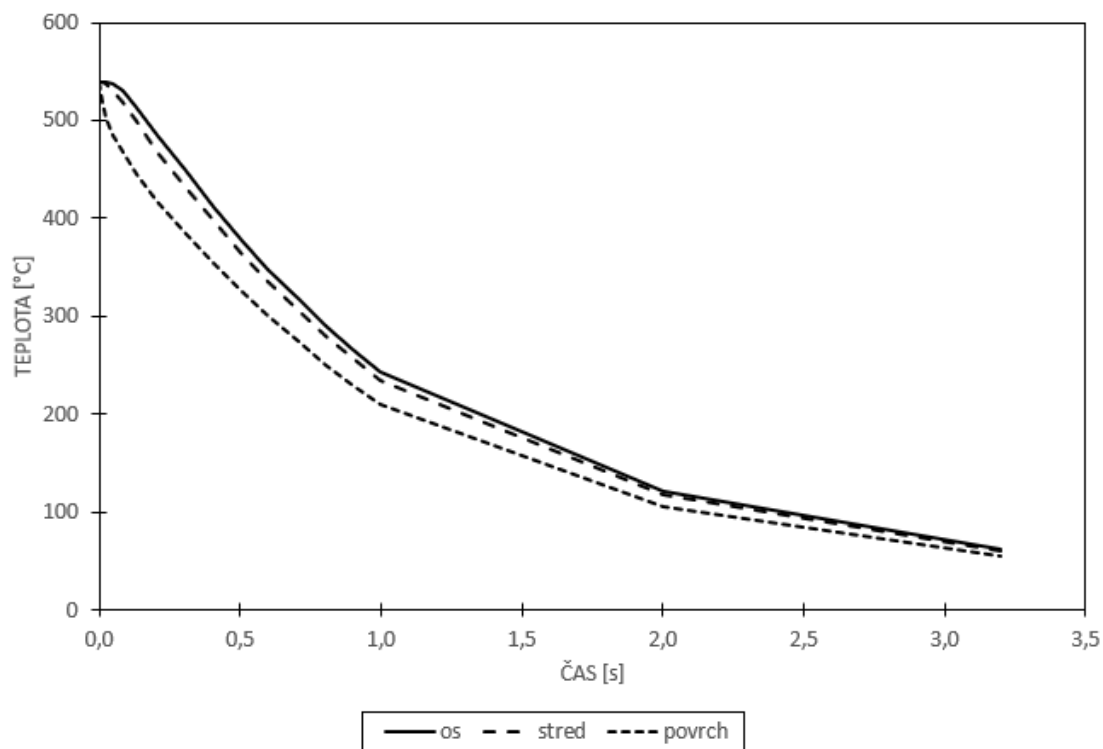
ného spracovania, najmä parametrami stárnutia. Pri danej teplote bolo pravdepodobne vhodné zvoliť dlhší čas. V tejto práci však nešlo o to, dosiahnuť maximálne hodnoty mechanických vlastností, ale o možnosť ich porovnať pri rôznych rýchlostiach ochladzovania pri ostatných parametroch konštantných. Preto nedosiahnutie maximálnych hodnôt nie je považované za problém.

Z kriviek ochladzovania určených pomocou simulácie (Obr. 4.1) je vidno, že rýchlosť ochladzovania v osi skúšobnej tyčky a v polovičnej vzdialenosti medzi osou a povrchom je takmer identická. Je to spôsobené vysokou tepelnou vodivosťou zliatiny a malým priemerom (12 mm) tyčky.

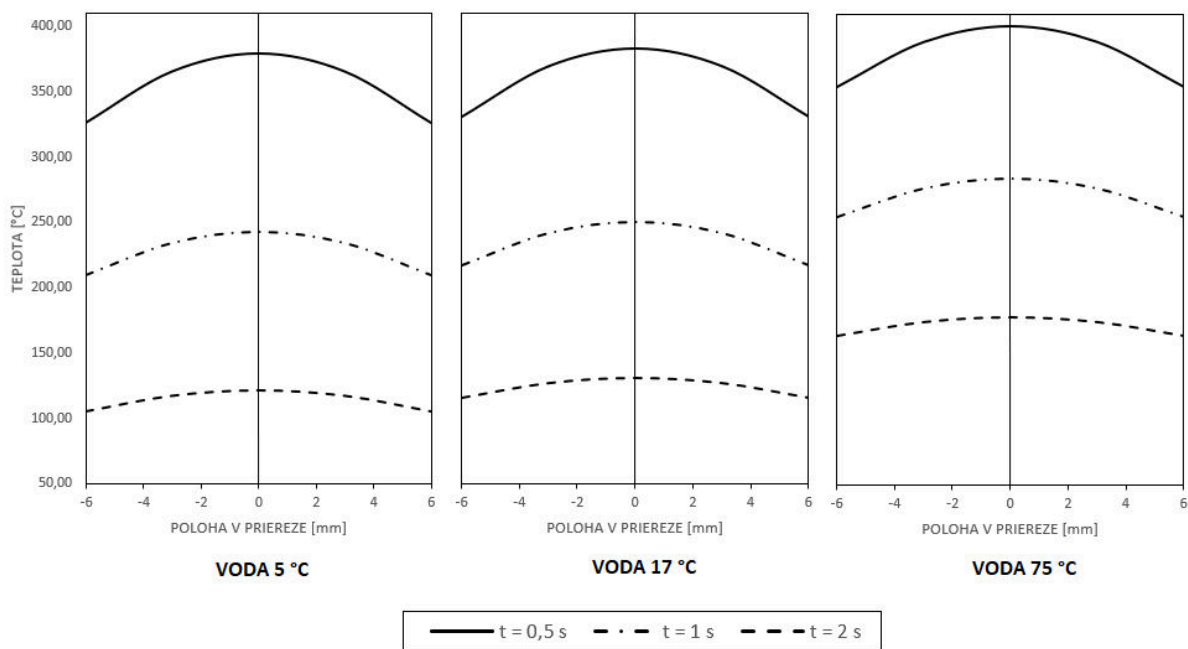
Na obr. 4.2 je znázornené rozloženie teplôt v priereze skúšobnej tyčky v rôznych časoch pri rôznych teplotách ochladzovacej vody. Údaje pochádzajú tiež zo simulácie. Vidno, že



## 4.2. MECHANICKÉ VLASTNOSTI



Obr. 4.1: Krivka ochladzovania určená simuláciou v osi skúšobnej tyčky, na povrchu a v polovičnej vzdialenosti medzi osou a povrchom pri ochladzovaní do vody s teplotou 5 °C

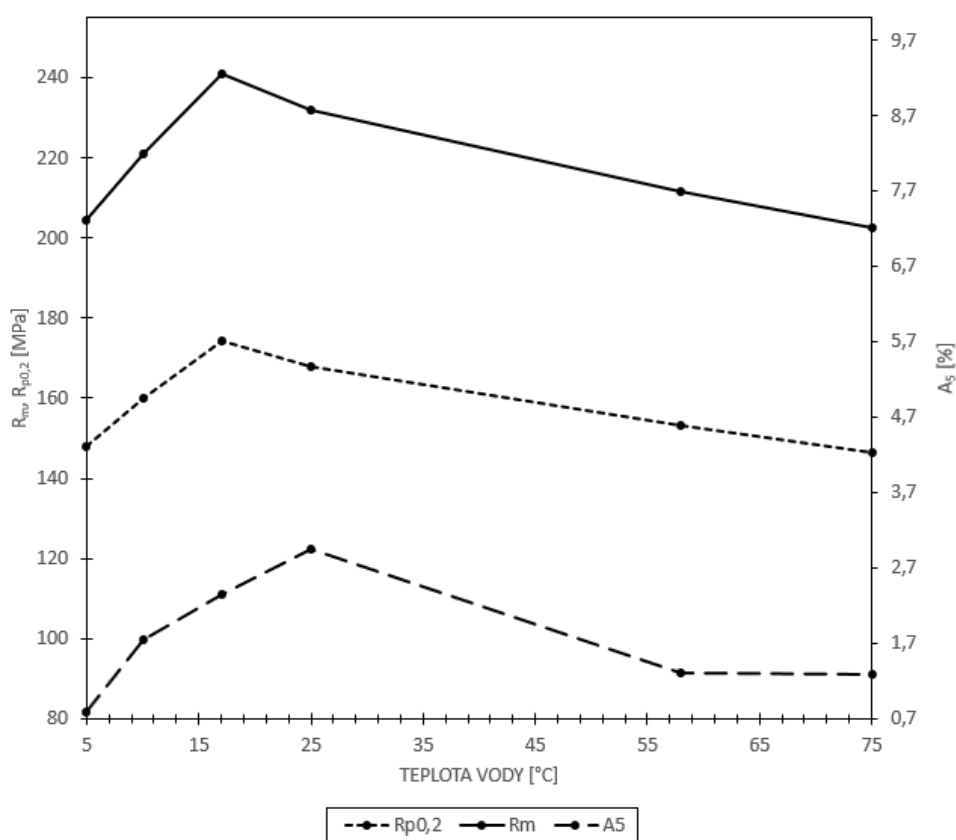


Obr. 4.2: Rozloženie teploty v priereze skúšobnej tyčky pri rôznych teplotách vody v čase 0,5 s, 1 s a 2 s po vhození do vody.

na začiatku ochladzovania je rozdiel medzi povrchom a osou súčiastky výrazný, časom sa ale znižuje. Vo všetkých troch prípadoch majú krivky takmer rovnaký tvar. Rozdiel je len v ich polohe na zvislej osi, kedy vzorky ochladzované do teplejšej vody majú krivku posunutú vyššie.

#### 4.2.1. Pevnosť v ťahu, ťažnosť

Závislosť mechanických vlastností (medza pevnosti, zmluvná medza klzu, ťažnosť), získaných ťahovou skúškou, na teplote ochladzovacej vody, resp. rýchlosti ochladzovania je zobrazená na obr. 4.3.



Obr. 4.3: Závislosť mechanických vlastností na teplote ochladzovacej vody

Maximálne hodnoty pevnosti a medze klzu boli dosiahnuté pri teplote vody 17 °C (vypočítaná rýchlosť ochladzovania 239 °C/s). Od tejto teploty hodnoty  $R_m$  a  $R_{p0,2}$  klesajú so zvyšujúcou sa teplotou vody. Tento trend korešponduje so zisteniami v [9][10]. Pri vyšších teplotách vody rýchlosť ochladzovania nie je dosť vysoká, čo spôsobuje nižšiu mieru presý-

## 4.2. MECHANICKÉ VLASTNOSTI

tenosti tuhého roztoku  $\alpha$ . Milkereit a kol. [9] učili ako kritickú rýchlosť ochladzovania pre túto zliatinu 60 K/s. Najnižšia priemerná rýchlosť ochladzovania (vypočítaná) dosiahnutá v tejto práci bola 189 °C/s. Kritická rýchlosť v [9] bola však určená na základe merania tvrdosti. Výsledky merania tvrdosti v tejto práci budú diskutované v kap. 4.2.2.

Ťažnosť dosiahla maximálne hodnoty pri vyššej teplote vody (nižšej rýchlosti ochladzovania), 25 °C. Ťažnosť vo všeobecnosti nedosahuje maximálne hodnoty vtedy, keď sú maximálne pevnosti, maximum je posunuté. Pri nižšej rýchlosti ochladzovania je čas na vylúčenie malého množstva koherentných precipitátov  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , ktoré majú na ťažnosť pozitívny vplyv. Pri ešte nižších rýchlostiach ochladzovania už sú precipitáty príliš hrubé, čo negatívne ovplyvňuje nie len ťažnosť ale aj pevnosť, klesajúci trend je teda spoločný.

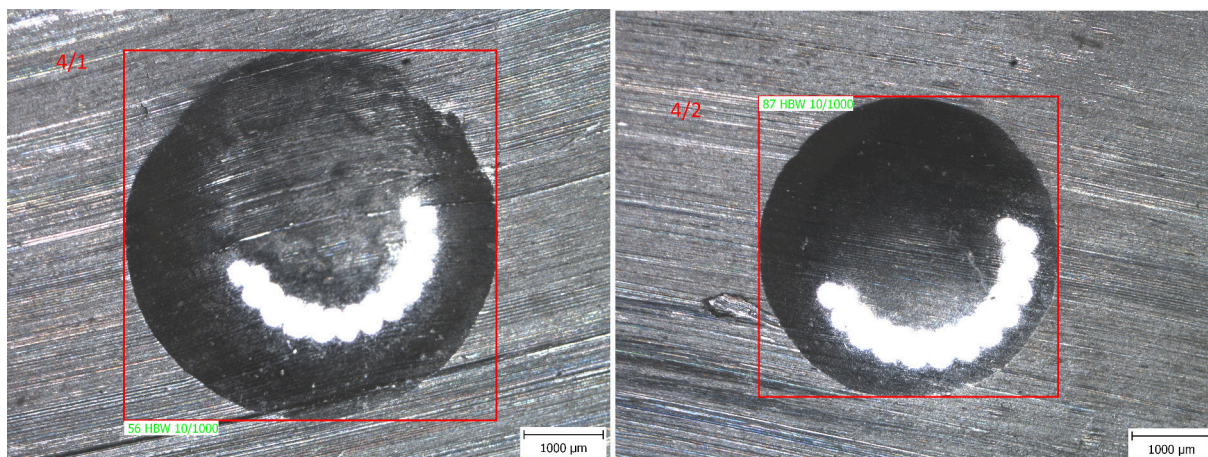
Pri ďalšom znižovaní teploty vody, resp. zvyšovaní rýchlosti ochladzovania experimenty ukázali pokles mechanických vlastností, pevnosti aj ťažnosti. Tento pokles je prudší ako pri znižujúcej sa rýchlosti ochladzovania. Takéto správanie sa nebolo doteraz v literatúre popísané. Možným vysvetlením je, že pri príliš vysokých rýchlostiach ochladzovania vzniká v materiáli pnutie, prípadne vznikajú mikrotrhliny. To môže spôsobovať pokles pevnosti a ťažnosti. Overenie tohoto predpokladu vyžaduje ďalšie skúmanie.

### 4.2.2. Tvrdosť

Namerané hodnoty tvrdosti sú uvedené v tab. 4.2 a dosahujú takmer hodnoty uvádzané v literatúre. Rozdiely v hodnotách sú pravdepodobne spôsobené chybou merania. Ako bude bližšie popísané v kap. 4.5, vzhľadom na to, že skúšobné tyčky boli odlievane, vyskytovala sa v nich objemová vada. V rovine rezu, na ktorej bola tvrdosť meraná táto vada nebola viditeľná (Obr. 4.4), takže sa pri meraní nedalo zaručiť, že vnikajúca guľička nebude zatlačená práve do nej. Preto sa pri meraní stávalo, že jedna hodnota bola výrazne nižšia ako ostatné. Predpokladá sa, že to bolo spôsobené práve zasiahnutím časti plochy s vadou.

Za predpokladu, že budeme hodnoty tvrdosti považovať pri všetkých meraniach za rovnaké, môžeme konštatovať, že teplota ochladzovacej vody a tým pádom rýchlosť ochladzovania nemá na tvrdosť zliatiny vplyv. Tieto zistenia sa zhodujú s výsledkami Milkereita a kol. [9].





Obr. 4.4: Stopa po guľičke po meraní tvrdosti podľa Brinella na dvoch vzorkách z tej istej tyčky, vľavo 56 HBW 10/1000, vpravo 87 HBW 10/1000

### 4.3. Lomová plocha po pretrhnutí

Na lomovej ploche vzniknutej po skúške ťahom sa dala pozorovať oblasť farebne sa odlišujúca, tmavšia (na obr. 4.5 označená šipkou), od zvyšku lomovej plochy. Na detailnej snímke sa dajú jednoznačne rozlíšiť obnažené dendrity, ide teda o zlievarenskú vadu. Veľkosť tejto vady bola na každej skúšobnej tyčke iná. Z toho vyplývajú výrazne rozdielne hodnoty pevností pri tyčkách podrobených tomu istému režimu tepelného spracovania. Ako príklad môžeme uviesť hodnoty medze pevnosti pri experimente s teplotou ochladzovacej vody 75 °C, ktoré boli 202 MPa, 233 MPa, 172 MPa.

Ako bolo spomenuté v kap. 4.2.2, okrem výsledkov ťahovej skúšky to ovplyvnilo aj meranie tvrdosti.

Na svetlejšej časti lomovej plochy sa dá pozorovať transkryštalický lom s typickými odleskami. Táto časť prierezu teda vadu neobsahovala.

Na základe tohoto zistenia sa ukázalo, že použitie odliatych skúšobných tyčiek vnáša do merania ďalšiu premennú, ktorá sa dá len ťažko kontrolovať a môže ovplyvniť jeho výsledky. Bolo by preto vhodnejšie použiť skúšobné teleso vyrezané z homogénnej časti odliatku bez väd.

#### 4.4. MIKROŠTRUKTÚRA PO TEPELNOM SPRACOVANÍ



Obr. 4.5: Makrosnímka lomovej plochy (vľavo), vpravo detail na tmavšiu časť s viditeľnými dendritmi.

#### 4.4. Mikroštruktúra po tepelnom spracovaní

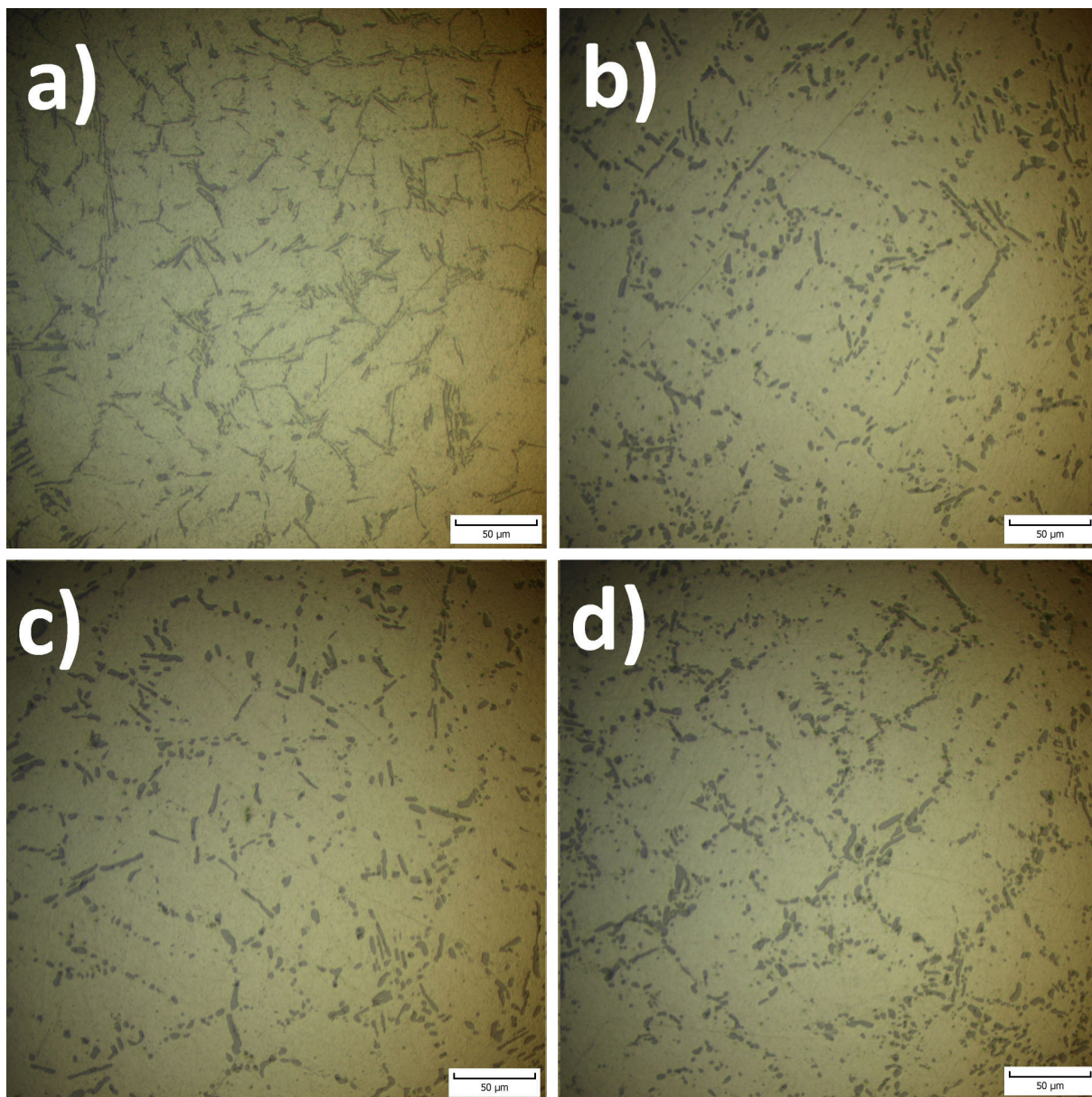
Na obr. 4.6 sú mikroštruktúry vzoriek ochladzovaných do najteplejšej (d) a najstudsnej (b) vody, vzorky s najvyššími hodnotami pevnosti (c) a vzorky, ktorá nebola tepelne spracovaná.

V mikroštruktúre na obr. 4.6a) vidno typickú hrubú lamelárnu štruktúru nemodifikovaného eutektického kremíka. Namerané hodnoty mechanických vlastností na tepelne nespracovanej skúšobnej tyčke korešpondujú s touto mikroštruktúrou.

Na obr. 4.6b)-d) sú mikroštruktúry tepelne spracovaných vzoriek. Pri tomto zväčšení nie je medzi smímkami viditeľný rozdiel. Eutektrický kremík je zaoblený vplyvom rozpúšťacieho žihania. Táto fáza tepelného spracovania bola pri všetkých experimentoch rovnaká, preto tento výsledok nie je prekvapivý. Rozdiel v morfológii eutektika v porovnaní s tepelne nespracovanou vzorkou je dôvodom skokového zlepšenia sa mechanických vlastností pri vzorkách po tepelnom spracovaní.

Pre pozorovanie precipitátov by bolo nutné väčšie zväčšenie na optickom mikroskope, prípadne použitie elektrónového mikroskopu. Jemné  $\beta'$  precipitáty môžu mať veľkosť 10 nm [10].





Obr. 4.6: Mikroštruktúra pri zväčšení 400x vzorky a) bez tepelného spracovania, b) ochladenej do vody s teplotou 5 °C, c) ochladenej do vody s teplotou 17 °C a d) ochladenej do vody s teplotou 75°C

## 5. Záver

V tejto práci bol testovaný vplyv režimu vytvrdzovania na výsledné mechanické vlastnosti hliníkovej zliatiny  $\text{AlSi7Mg0,3}$ . Ide o bežnú zliatinu používanú pri gravitačnom a nízkotlakom odlievaní. Pri všetkých experimentoch boli parametre rozpúšťacieho žihania a umelého stárnutia (precipitačného vytvrdzovania) rovnaké. Menila sa teplota vody, do ktorej boli vzorky po rozpúšťacom žíhaní ochladzované. Tým sa menila rýchlosť ochladzovania.

To, či teplota kokily, do ktorej boli odlievané skúšobné vzorky ovplyvní hodnotu DAS bolo overené metalografickou metódou. Pozorovanie ukázalo, že v rozsahu teplôt cca  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  teplota kokily na tento parameter nemá vplyv.

Maximálne hodnoty pevnosti v ťahu a zmluvnej medze klzu dosiahla vzorka ochladzovaná do vody s teplotou  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ . So zvyšujúcou sa teplotou vody hodnoty pevnosti klesali, čo korešponduje so zisteniami predchádzajúcich štúdií. Ďalej sa zistilo, že pri znižujúcej sa teplote vody pod teplotu, pri ktorej boli dosiahnuté maximálne hodnoty sa pevnosti tiež znižovali. Je možné, že toto správanie sa je spôsobené pnutím, ktoré v testovacej vzorke vzniklo. Dôkladné vysvetlenie tohoto správania sa vyžaduje ďalšie skúmanie. Hodnoty ťažnosti mali rovnaký trend ako pevnosti s tým rozdielom, že maximálnu hodnotu nadobúdali pri teplote vody  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Účinok rozpúšťacieho žihania bol overený pozorovaním mikroštruktúry. Bolo zistené, že pri vybraných reprezentačných vzorkách nebol medzi nimi z pohľadu mikroštruktúry rozdiel.

Na lomových plochách po skúške ťahom boli pozorovateľné oblasti so zlievarenskou vadou, ktorej veľkosť bola na každej vzorke iná. Táto vada bola premennou, ktorá sa dá len ťažko kontrolovať a môže znehodnocovať výsledky tým, že ovplyvňuje mechanické vlastnosti testovaných vzoriek nezávisle na parametroch experimentu, ktorých vplyv bol skúmaný. Preto by bolo pre ďalší výskum vhodné zvoliť vzorky odobrané zo zdravej časti odliatku.

# Literatúra

- [1] MICHNA, Š. a kol.: *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
- [2] ROUČKA, J.: *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Cerm, 2004. ISBN 80-214-2790-6
- [3] PTÁČEK, L. a kol.: *Nauka o materiálu II*. Brno: Cerm, 2002. ISBN 80-7204-248-3
- [4] *ASM Handbook, Volume 4 - Heat Treating*. ASM International, 1991. ISBN 0-87170-379-3
- [5] PTÁČEK, L. a kol.: *Nauka o materiálu I*. Brno: Cerm, 2003. ISBN 80-7204-283-1
- [6] LONG, H.C. et al.: The negative effect of solution treatment on the age hardening of A356 alloy. *Materials and Science Engineering A*, 566, 2013, p.112-118.
- [7] ROMETSCH, P.A., ARNBERG, L., ZHANG D.L.: Modelling dissolution of Mg<sub>2</sub>Si and homogenisation in Al-Si-Mg casting alloys. *International Journal of Cast Metals Research*, 12, 1999, p.1-8.
- [8] HERNÁNDEZ PAZ, J.F.: *Heat Treatment and Precipitation in A356 Aluminum Alloy*. [Dizertačná práca.] Montreal: McGill University, Department of Mining, Metals and Materials Engineering, 2003. 102 s.
- [9] MILKEREIT, B., et al.: Continuous cooling precipitation diagram of cast aluminium alloy Al-7Si-0.3Mg. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24, 2014, p.2025-2033. DOI: 10.1016/S1003-6326(14)63308-2
- [10] ZHANG, D.L., ZHENG, L.: The Quench Sensitivity of Cast Al-7 Wt Pct Si-0.4 Wt Pct Mg Alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 27A, 1996, p.3983-3991.
- [11] *Aluminium-Gußlegierungen*. VDS. 1988. ISBN 3-87260-092-3
- [12] KAUFMAN, J.G., ROOY, E.L.: *Aluminium Alloy Castings*. ASM. 2004. ISBN 0-87170-803-5
- [13] MILKEREIT, B., et al.: Continuous cooling precipitation diagrams of Al-Mg-Si alloys. *Materials and Science Engineering A*, 550, 2012, p.87-96.

## LITERATÚRA

- [14] *The Aluminium - Copper System*. [online]. Dostupné na [1.10.2018]:  
[https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/iss/kap\\_8/advanced/a8\\_2\\_2.html](https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/iss/kap_8/advanced/a8_2_2.html)